

5501/2-79



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований

дубна

29/2-79

P9 - 12673

M-345

И.М.Матора, О.А.Стрелина

О СОХРАНЕНИИ СВОЙСТВА
ЛАМИНАРНОСТИ ПОТОКА ЭЛЕКТРОНОВ В ЛИУ

1979

P9 - 12673

И.М.Матора, О.А.Стрелина

О СОХРАНЕНИИ СВОЙСТВА
ЛАМИНАРНОСТИ ПОТОКА ЭЛЕКТРОНОВ В ЛИУ

Матора И.М., Стрелина О.А.

P9 - 12673

О сохранении свойства ламинарности потока электронов в ЛИУ

Исследована эволюция набора радиальных траекторий электронов на протяженном /длиной 219 м/ тракте линейного индукционного ускорителя ЛИУ-30. Показано, что инжектированный ламинарный пучок при дальнейшем ускорении всюду сохраняет ламинарность только в том случае, когда проекция его начального фазового объема на плоскость (r_0, r'_0) есть отрезок прямой, проходящей через начало координат. Предложено непараксиальное уравнение для расчета траекторий в мощных осесимметричных электронных ламинарных равноплотных пучках.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Matora I.M., Strelina O.A.

P9 - 12673

On Conservation of Laminar Properties
of Electron Beam in LIA

An evolution of collecting radial electron trajectories along the extended path (219 m long) of the linear induction accelerator LIA-30 is studied. It is shown that an injected laminar beam being accelerated remains laminar, if the projection of its initial phase volume on the (r_0, r'_0) plane is a straight line going through the coordinate origin (r_0, r'_0 is the initial radius and its derivative over z , respectively, being taken along the symmetry axis). Linear tolerance for the $r'_0(r_0)$ dependence within which trajectories interest only at the exit is found. An accuracy of trajectory calculation using paraxial approximation is discussed.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрение поведения огибающей траектории ускоряемого в ЛИУ сильноточного электронного осесимметричного пучка, удерживаемого магнитным полем, в параксиальном приближении показало, что при условии сохранения ламинарности потери пучка за счет поперечного движения можно полностью устранить^{/1-4/}.

Ниже приводятся результаты исследования условий, необходимых для обеспечения сохранения свойства ламинарности потока электронов на ускорительном тракте ЛИУ-30^{/5/}, полученные при интегрировании непараксиального уравнения для расчета траекторий^{/6/}.

ТЕОРИЯ

Точное релятивистское уравнение для расчета траекторий электронов в сильноточных осесимметричных ламинарных пучках, записанное в цилиндрической системе координат и гауссовой системе единиц, имеет вид^{/6/}:

$$\begin{aligned} r'' = & \frac{\sigma}{\gamma \beta_z^2} \left\{ r' \left[-\frac{\partial V}{\partial z} - \frac{2I}{c\Gamma} \beta_z r' + \frac{\sigma}{\gamma} \left(A_\phi - \frac{\alpha}{r} \right) \frac{\partial A_\phi}{\partial z} \right] + \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{2I}{c\Gamma} \beta_z - \right. \\ & \left. - \frac{\sigma}{\gamma} \left(A_\phi - \frac{\alpha}{r} \right) \left(\frac{\partial A_\phi}{\partial r} + \frac{\alpha}{r^2} \right) \right\}; \end{aligned}$$

$$\phi' = \frac{\sigma}{\partial \beta_z r} \left(A_\phi - \frac{\alpha}{r} \right);$$

$$f' \equiv \frac{df}{dz}; \quad \sigma = \frac{|e|}{m_0 c^2}, \quad \gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-1/2} = 1 + \sigma V, \quad \beta_z = \frac{1}{\gamma} \left[\frac{\gamma^2 - 1 - \sigma^2 \left(A_\phi - \frac{\alpha}{r} \right)^2}{1 + r'^2} \right]^{1/2};$$

I - амплитуда тока, заключенного в круге радиуса r ; e, m_0 - заряд и масса покоя электрона; c - скорость света; V - скалярный и A - векторный осесимметричные потенциалы суммарного электрического и магнитного внешнего поля и поля пучка; $\alpha = r_0 A_0, r_0$ - радиус вылета электрона с катода, A_0 - соответствующая ему величина A_ϕ .

Азимутальное движение электронов, ускоряемых в ЛИУ-30 до 30 МэВ, при токе пучка 250 А практически не ослабляет напряженности внешнего удерживающего магнитного поля. Поэтому выражение $A_\phi(r, z)$ можно получить стандартными методами как по результатам измерений хода величины напряженности внешнего магнитного поля вдоль оси ускорительного тракта, так и вычислением по известным формулам для поля системы соосных соленоидов. В последнем случае возмущениями, вносимыми ферромагнитными деталями ускорителя, пренебрегается.

Чтобы оправдать применение расчетного $A_\phi(r, z)$, было проведено сравнение результатов вычисления траекторий на начальном отрезке ускорительного тракта при обоих способах выражения A_ϕ . Выводы о необходимых для сохранения ламинарности траекторий условиях оказались одинаковыми в обоих случаях. Излагаемые расчеты для всего тракта ЛИУ-30 длиной 219 м были выполнены с расчетными значениями $A_\phi(r, z)$.

Скалярный потенциал в общем случае можно рассчитать с помощью трудоемкого численного интегрирования самосогласованного уравнения Пуассона. Однако в ламинарном равноплотном пучке /в каждом сечении $z = \text{const}$ / со слабо развитым поперечным движением хорошим приближением к $V(r, z)$ является, как легко показать, выражение

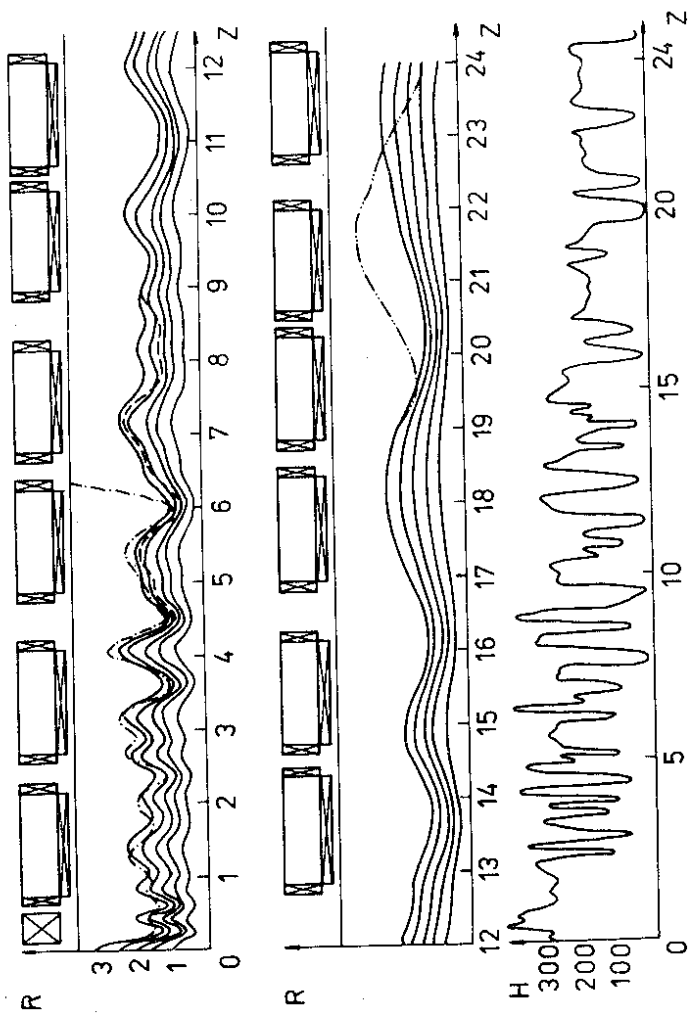
$$V(r, z) = V_A + V_y(r, z) + \frac{I_n}{c\beta_a(z)} \left(\frac{r^2}{R^2} - 1 - 2 \ln \frac{R_c}{R} \right), \quad /2/$$

в котором $V_A = \text{const}$ - амплитуда напряжения на катоде электронной пушки, $-eV_y$ - полный прирост энергии за счет вихревого ускоряющего поля, I_n - полный ток пучка, $R(z)$ - радиус огибающей траектории, $R_c(z)$ - радиус покрытой резистивным слоем стенки вакуумной камеры, $c\beta_a$ - средняя по сечению пучка продольная скорость частиц. Зависимости $R(z)$ и $R_c(z)$ предполагаются плавными.

Из /1/ и /2/ вытекает выражение для γ в любой точке пучка:

$$\gamma(r, z) = \gamma_A \left\{ 1 + D \left(\frac{r^2}{R^2} - 1 - 2 \ln \frac{R_c}{R} \right) \right\}; \quad \gamma_A = 1 + \sigma \frac{V_A + V_y}{c\beta_a \gamma_A}; \quad D = \frac{\sigma I_n}{c\beta_a \gamma_A}. \quad /3/$$

В выражении /3/ при $I_n = 250$ А безразмерный параметр D не превосходит $1,5 \times 10^{-2}$ даже для энергии инжекции 250 кэВ. Благодаря этому, из /1/ и /3/ следует, что в ламинарном равноплотном пучке ЛИУ-30 с точностью до малых 2-го порядка по D электроны имеют постоянную по сечению продольную скорость, причем



Ход траекторий электронов в инжекторном участке ЛИУ-30. г - в сантиметрах, z - в метрах. Внизу - распределение поля $H_z(0,z)$ в эрстедах.

$$\beta_z(r) = \beta_a = \beta_A \left[1 - \frac{\sigma I_n}{c(\gamma_A^2 - 1)^{3/2}} \left(1 + 2 \ln \frac{R_c}{R} \right) \right]; \quad \beta_A = \left(1 - \frac{1}{\gamma_A^2} \right)^{1/2} \quad /4/$$

/изменением $V_y(r)$ при каждом $z = \text{const}$ в условиях ЛИУ можно пренебречь/. Учитывая все вышеизложенное, из /1/ получаем окончательный вид непараксиального уравнения радиальных траекторий в ламинарных равноплотных при каждом $z = \text{const}$ пучках ЛИУ на сотни ампер ускоряемого тока /5/. В нем учтены как кинематические нелинейности, так и эффекты объемного заряда, вызывающие вариации $\gamma(z)$, связанные с изменениями поперечного пучка $2R(z)$ вдоль ускорительного тракта, а также зависимость $\gamma(r)$ при каждом $z = \text{const}$. В разложениях A_ϕ сохранены слагаемые с производными от напряженности поля $H^{(n)}(0, z)$ до 2-го порядка.

$$\begin{aligned} r'' = \frac{1}{\gamma \beta_a^2} \left\{ -\frac{\sigma^2}{\gamma} \left(\frac{H}{2} r - \frac{a}{r} - \frac{H''}{16} r^3 \right) \left(\frac{H}{2} + \frac{a}{r^2} - \frac{3H''}{16} r^2 - \frac{H'}{2} r \right) - \gamma' r' + \right. \\ \left. + \frac{2\sigma I_n}{c\beta_a r} \left[(1 - \beta_a^2) \frac{r^2}{R^2} - r'^2 \left(1 + \frac{r^2}{R^2} \beta_a^2 \right) \right] \right\}. \quad /5/ \end{aligned}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рисунке изображена электронно-оптическая схема 24-метрового начального участка ЛИУ-30, сообщаемого электронам прирост энергии 3 МэВ. Каждая из его 12 ускорительных секций состоит из 12 индукторов с имеющимися внутри них фокусирующими соленоидами. Кроме того, несколько соленоидов есть на входе в ускоритель, и на обоих концах каждой секции установлено по одному соленоиду.

Все остальные 5 ускорительных участков содержат секции, состоящие каждая из 14 индукторов меньшего диаметра без соленоида внутри них, а фокусировка пучка осуществляется отдельными соленоидами, установленными между некоторыми секциями. Внутренняя поверхность ускорительной трубки диаметром 7,5 см покрыта тонким резистивным заземленным на концах секций слоем.

Ход рассчитанных траекторий показан лишь на начальном, наиболее трудном для проводки пучка, участке. Тонкими сплошными линиями даны траектории, входные данные r_0, r'_0 которых на фазовой плоскости (r_0, r'_0) расположены на прямолинейном луче, исходящем из начала координат. Одна из внутренних траекторий с входными данными, отличающимися от прямолинейно-лучевых, изображена пунктиром. Огибающая траектория была рассчитана как по /5/, так и в параксиальном приближении,

в котором по сравнению с /5/ игнорировались кинематические нелинейности /полагалось $\gamma'^2 = 0$ и $y = y_A$ /, с одними и теми же входными данными. Огибающая параксиального приближения - штрихпунктир. Начало расчета параксиальной огибающей принималось в одном случае при $z_0 = 0$ и в другом - при $z_0 = 13$ м /см. рисунок/. Ход напряженности внешнего осесимметричного магнитного поля $H(0, z)$ дан внизу.

Набор траекторий с прямой лучевой проекцией фазового объема на плоскость (r_0, r'_0) остается ламинарным на протяжении всех 219 м ускорительного тракта ЛИУ-30 независимо от наклона луча $r'_0 = kr_0$. В то же время любое искривление проекции начального фазового объема приводит к возникновению пересечений между траекториями. Например, смещение траектории на $\frac{\delta r'_0}{r'_0} = 0,2$ от траектории, лежащей на прямолинейном луче, привело к пересечению ее с огибающей уже на 9-м метре от входа /при r на входе, равном 2,5 см/. Разумеется, перед утратой пучком ламинарности точность счета понижается, однако несмотря на это, факт утраты пучком ламинарности расчет фиксирует достаточно объективно.

Насколько предлагаемая теория и методика расчета уточняют параксиальное приближение, видно из сравнения хода огибающих, рассчитанных обоими способами. Время счета на ЭВМ практически одинаковое. Видно, что по крайней мере для начального отрезка тракта параксиальное приближение не дает необходимой точности.

Таким образом, с помощью интегрирования непараксиального уравнения траекторий в ламинарных равноплотных при каждом $z = \text{const}$ осесимметричных пучках, ускоряемых в ЛИУ на сотни ампер тока, показано, что свойство ламинарности потока электронов сохраняется на протяженном ускорительном тракте только в случае, когда проекция начального фазового объема пучка является прямолинейным лучом, исходящим из начала координат плоскости (r_0, r'_0) .

В заключение приносим искреннюю благодарность Л.А. Меркулову за помощь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вахрушин Ю.П., Кузнецов В.С. ЖТФ, 1969, 39, с. 506.
2. Матора И.М., Меркулов Л.А., Шелонцев И.И. ОИЯИ, Р9-5268, Дубна, 1970.
3. Вахрушин Ю.П. и др. ОИЯИ, Р9-5714, Дубна, 1971.

4. Вахрушин Ю.П. и др. В книге: Труды VII Международной конференции по ускорителям" Ереван, 1969, т. 1, с. 173; Изд. АН Арм.ССР, Ереван, 1970.
5. Ананьев В.Д. и др. ОИЯИ, 13-4392, Дубна, 1969.
6. Матора И.М. ОИЯИ, Р9-11407, Дубна, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел
17 июля 1979 года.